Projet LEOPARD

© John Meyer, 2015

1 Introduction

Nous avons créé la famille de haut-parleurs LEO pour produire les meilleurs haut-parleurs linéaires possibles, avec une distorsion réduite à sa limite théorique. LEOPARD est un petit élément de la famille LEO auquel aucun marché spécifique n'a été attribué. Nous l'avons présenté à nos ingénieurs comme un défi pour voir de quelle façon il pourrait être conçu.

Qu'entendons-nous par « système idéal de haut-parleurs » ? Un haut-parleur idéal reproduirait un son qu'une personne serait incapable de distinguer de celui provenant directement de la source sonore.

En bref, LEOPARD est plus puissant et présente moins de distorsion qu'un haut-parleur de taille comparable. Avant d'aborder sa conception, nous devons d'abord comprendre la façon dont nous percevons et mesurons les sons. Lors de la description de LEOPARD, nous traitons également de la théorie et de l'histoire des haut-parleurs, afin que cette réalisation soit examinée dans son contexte.

2 Mesure des tonalités et des notes

Que savons-nous sur les sons pour nous guider vers la création du haut-parleur idéal ?

Nous percevons des sons parce que nos tympans (membranes tympaniques) se déplacent d'avant en arrière en phase avec les variations de pression créées par toutes les sources sonores, y compris les instruments de musique et les voix.

La vibration crée une onde dans l'air qui s'éloigne de la source sonore à une vitesse d'environ 344 m/s au niveau de la mer et à température ambiante. Toutes les fréquences sonores se déplacent à la même vitesse dans l'air.[1] Les ondes sonores se comportent dans l'air comme des ondes électromagnétiques (radio ou lumière), ce qui signifie que l'utilisation des lois fondamentales de la physique permet de prédire leur interaction avec un objet solide, tel qu'un mur.

---

[1] Notez que les ondes à la surface de l'eau ont un comportement non linéaire qui diffère de celui des ondes de pression dans l'air. Par exemple, les ondes à la surface de l'eau qui présentent un grand espacement entre les crêtes se déplacent plus lentement que celles avec un espacement plus court.

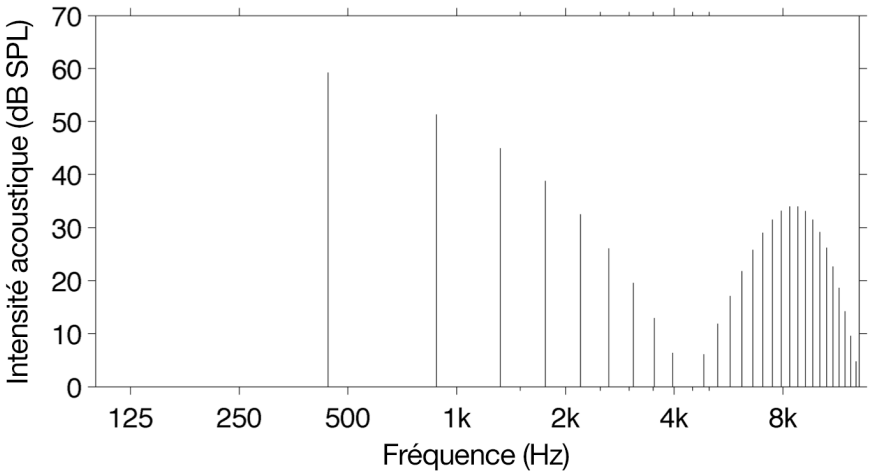


Figure 1. Spectre de fréquence idéal de la note A (440 Hz) jouée sur un piano après avoir atteint un état stable.

Les notes d'instruments de musique sont une combinaison de tonalités pures à l'état stable, qui existent dans un « espace indépendant du temps ». Tout le reste — début, fin, décalages de fréquence, variations de gain, limiteurs, compresseurs, etc. — se trouve dans un « espace dépendant du temps ».

Que signifient les termes « notes » et « tonalités pures » ? Examinons la tonalité A440. Un diapason marqué A440, lorsqu'il est frappé, produit une onde de compression où la pression de l'air va et vient 440 fois par seconde. Nous appelons cela une tonalité pure ou une fréquence d'onde sinusoïdale de 440 Hz.

Une note, cependant, peut contenir plusieurs tonalités. Par exemple, une note de 440 Hz jouée sur un piano peut comprendre une tonalité de 440 Hz (la tonalité fondamentale) associée à des tonalités de 880 Hz et 1 320 Hz (les harmoniques). En réalité, les notes de piano peuvent comprendre plus de 10 harmoniques. La figure 1 montre l'amplitude en fonction du spectre de fréquence d'une note théorique de 440 Hz à l'état stable jouée au piano.

Les sources sonores à l'état stable ne changent pas leur fréquence (hauteur) ni leur amplitude (sonie) au fil du temps, ou du moins pas au cours de leur enregistrement. Il est donc nécessaire de laisser la note ou la tonalité atteindre un état stable avant de la mesurer.

Si des notes simples jouées sur un piano sont enregistrées avec un microphone sensible à la pression, les notes peuvent être clairement identifiées dans l'enregistrement, car chaque note s'estompe assez rapidement (figure 2). Pour trouver la fréquence d'une note, il faut d'abord l'isoler, comme l'illustre l'enregistrement sur 300 ms du graphique inférieur de la figure 2.

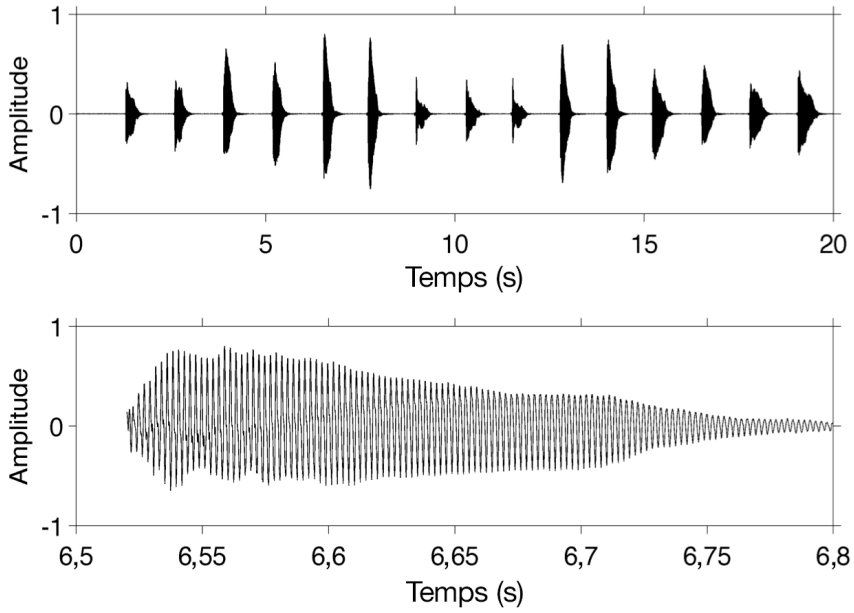


Figure 2. Enregistrement de plusieurs notes simples jouées sur un piano (en haut), avec un zoom sur une seule note (en bas).

La transformée de Fourier de l'enregistrement de la note isolée montre un spectre qui diffère fortement de celui de la note de piano idéale (figure 3). Le problème vient du fait que nous avons capturé le coup initial du marteau frappant la corde en même temps que la détérioration résultante de l'amplitude. Comme vous pouvez le voir, la

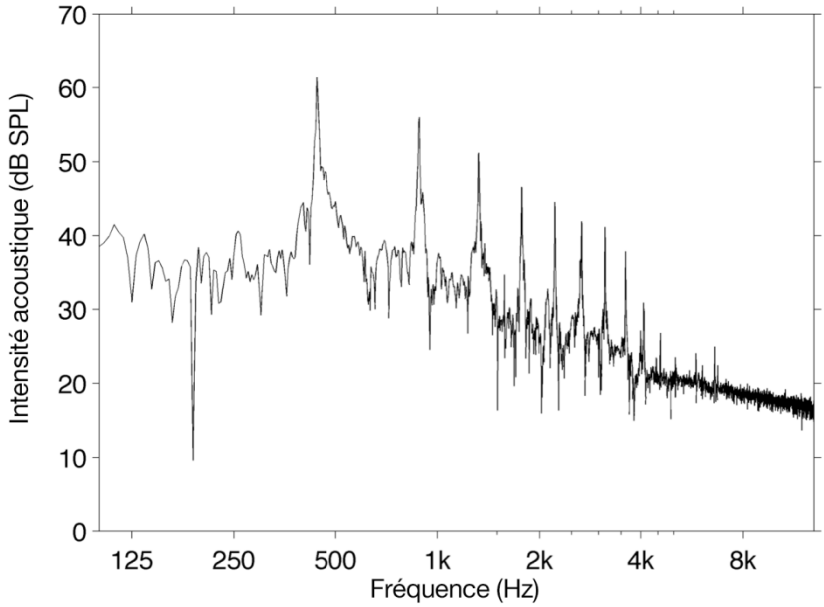


Figure 3. Spectre d'intensité de la note de piano illustrée en bas de la figure 2. Remarquez les différences par rapport au spectre idéal de la figure 1.

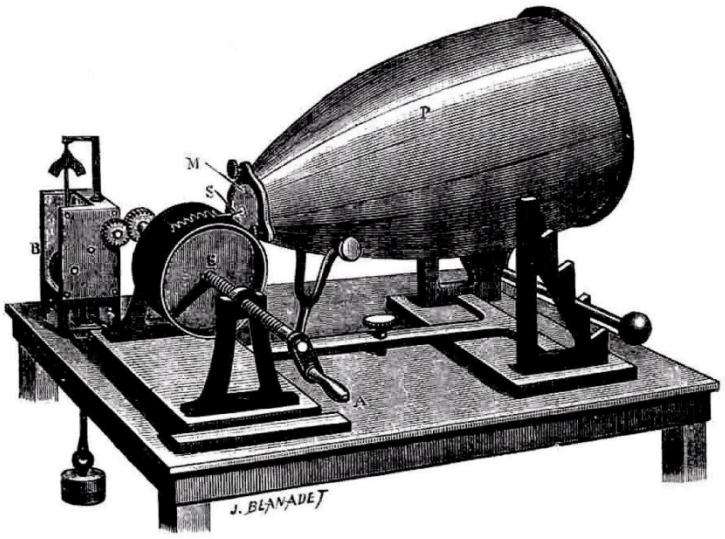


Figure 4. Phonautographe de Scott, commercialisé en 1860 pour mesurer la forme des ondes sonores.

forme de l'onde change constamment, sauf sur des périodes très courtes, et la note ne semble pas atteindre d'état stable. Cet aveuglement aux variations temporelles est l'un des inconvénients de l'analyse spectrale, et il convient de s'en souvenir chaque fois que vous examinez un analyseur de spectre. En revanche, nos oreilles sont excellentes pour entendre les changements temporels. Rechercher la note enfouie dans l'enregistrement reste toujours utile, et ce point sera traité dans un autre article sur la mesure indépendante des sources (SIM) ; cependant, de nombreux systèmes de mesure et dispositifs de traitement considèrent les « choses entre les notes » comme du bruit.

Helmholtz a montré comment créer des notes en utilisant de multiples sources de tonalité unique dans les années 1850. Par exemple, il était possible de commencer à simuler une note de piano au moyen de diapasons aux bonnes fréquences. Commençons par trois sources sonores distinctes, espacées de quelques dizaines de centimètres, chacune produisant une tonalité pure et stable unique à 440, 880 et 1 320 Hz. Mesurons alors les variations rapides de pression dans l'air quelques mètres plus loin. Helmholtz utilisa le phonautographe de Scott (breveté en 1857), qui gravait l'onde de pression sur un cylindre tournant de sorte à pouvoir visualiser l'enregistrement de la note (figure 4). Ce procédé est identique aux équipements d'enregistrement modernes ou à l'oreille humaine, qui sont également sensibles à la pression.

Helmholtz constata que les tonalités pures de chaque source s'additionnaient dans l'air pour créer une forme d'onde combinée (figure 5). Supposons que vous choisissiez une position de mesure où les trois tonalités (ondes sinusoïdales) ont une amplitude nulle au même moment (extrême gauche des graphiques). Les tonalités sont alors synchronisées, ou en phase. Pour une autre position de mesure, l'onde combinée aura une forme différente (figure 6). Cela vient du fait que la distance de

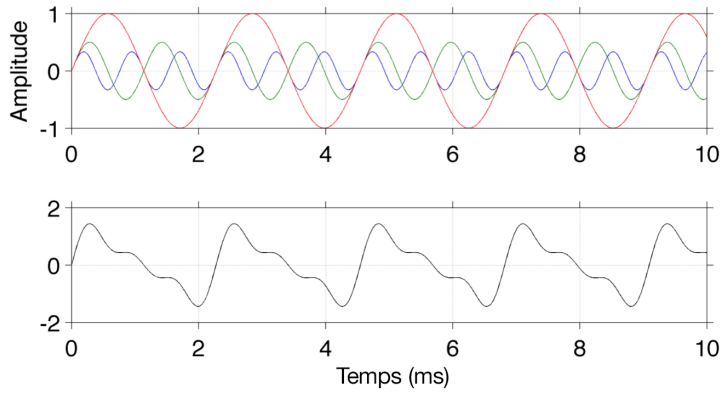


Figure 5. Enregistrement sur 10 ms de trois tonalités pures de 440, 880 et 1 320 Hz en phase. Le phonautographe aurait enregistré la forme d'onde du bas.

chaque source sonore a changé, affectant alors la relation de phase entre les tonalités. Dans ce cas, l'amplitude de chaque tonalité n'est jamais nulle au même moment. Nous disons alors que les ondes sinusoïdales ne sont *pas* en phase, ou que les harmoniques présentent un déphasage ou un décalage de phase.

Helmholtz observa que le décalage de phase entre les tonalités ne changeait pas la sonorité de la note. Les deux notes créées ci-dessus ont la même sonorité. C'est pour cette raison que la notion de notre insensibilité aux phases a pris naissance. Helmholtz ne l'a néanmoins pas affirmé comme tel, soulignant qu'il n'était pas en mesure d'étudier les sons non harmoniques. Comme nous le savons maintenant, il s'agit d'un cas particulier, parce que les notes sont à l'état stable et sont très simples. De façon plus générale, nous ne sommes pas insensibles aux phases pour les signaux qui varient au cours du temps.

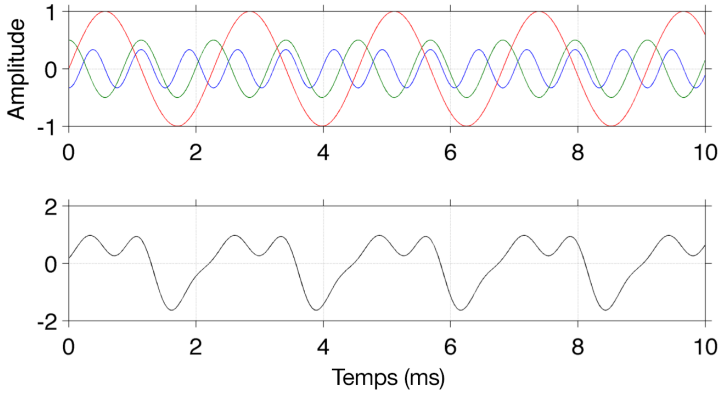


Figure 6. Enregistrement sur 10 ms de trois tonalités pures de 440, 880 et 1 320 Hz déphasées, illustrant une forme d'onde combinée différente de celle de la figure 5.

Les recherches de Helmholtz sur les notes musicales reposent sur des travaux antérieurs de Fourier. Cette approche est désormais largement utilisée et s'appelle analyse de Fourier ou de spectre. Elle utilise une fonction mathématique appelée transformée de Fourier qui permet de convertir une onde sonore à l'état stable du domaine temporel au domaine fréquentiel, dans lequel chaque fréquence a une amplitude et une phase. Rappelons que la transformée de Fourier suppose que la source sonore ne change jamais ; elle émet depuis toujours et continuera toujours d'émettre. Ceci est important car les relations spatiales des sources sonores à l'état stable sont perdues, comme nous le verrons plus loin. Nous avons donc appris que pour reproduire fidèlement une note à l'état stable, nous avions besoin d'un haut-parleur capable de reproduire toutes les fréquences à la bonne sonie.

Mais ce n'est pas la seule exigence requise d'un bon haut-parleur. Il doit également reproduire la phase fidèlement afin de reproduire des sons plus complexes. Les expériences de Helmholtz montrent que la phase est à bien des égards équivalente aux écarts temporels entre les fréquences. Un son qui change au fil du temps doit être reproduit avec une bonne réponse de phase.

Nos trois sources sonores produisant une note de fréquence 440 Hz en est un exemple. En laissant la source produisant la tonalité fondamentale proche de notre microphone de mesure, éloignons la source de 880 Hz de 150 mètres et la source de 1 320 Hz de 300 mètres. Nous avons maintenant besoin, afin d'obtenir la même sonie au microphone, d'augmenter la sonie des sources éloignées. Après avoir laissé les sources émettre pendant un certain temps (en état stable), nous constatons la même forme d'onde de pression qu'avant, lorsque toutes les sources étaient proches. En fait, il est impossible de savoir qu'une source est à 150 ou 300 mètres de distance tant qu'elle produit une tonalité continue. Cependant, si nous éteignons toutes les sources sonores en même temps, les harmoniques peuvent être entendus jusqu'à une seconde après que la fréquence fondamentale se soit estompée.

La reproduction du bruit d'un tambour, ou d'un pétard, fournit un autre exemple de l'importance de la phase. La forme d'onde de pression ressemble, dans ce cas, à un pic aigu, et l'analyse de Fourier démontre qu'il contient toutes les fréquences correspondant à un seul point dans le temps. La forme d'onde est modifiée quand une fréquence est retardée et arrive plus tard que les autres, typiquement lorsqu'un haut-parleur reproduit le son. Ce genre de retard de phase peut modifier la réponse tonale et transitoire du tambour. Notez que, dans ce cas, il est très facile d'entendre l'effet du décalage de phase, car l'état n'est pas stable ; la pression change très rapidement au fil du temps.

3 LEOPARD

Regardons maintenant comment les haut-parleurs produisent un son, en examinant d'abord la réponse en fréquence et en poursuivant avec la puissance, la distorsion et la directivité. Dans chaque section, nous verrons comment la conception de LEOPARD a pris cet aspect en charge.

3.1 Réponse en fréquence

Qu'entend-on par la réponse en fréquence d'un système de haut-parleurs, ou fonction de transfert ? Une « fonction de transfert », décrit la nature du système en cours de test et non pas comment il est mesuré. Par exemple, la sortie d'un appareil avec une fonction de transfert de 2 sera le double de son entrée.

La fréquence et la réponse de phase de la fonction de transfert d'un système de haut-parleurs décrivent le niveau et la synchronisation de toutes les tonalités reproduites par le système par rapport au signal d'entrée. Le système de haut-parleurs doit reproduire toutes les tonalités entre 32 et 16 000 Hz pour assurer la reproduction de toutes les formes de musique. Comme il existe un nombre infini de fréquences comprises entre 32 et 16 000 Hz, nous devons définir une limite pratique pour la résolution. Avec 64 tonalités par octave, nous obtenons 576 tonalités pour ces neuf octaves, ce qui devrait couvrir toutes les formes de musique.

Nous pourrions émettre une tonalité à la fois pour mesurer le haut-parleur. Chaque tonalité doit durer au moins une seconde pour assurer une réponse à l'état stable. En procédant ainsi, la mesure des 576 tonalités prend environ 10 minutes. La réponse à la puissance ou l'amplitude nous indique les tonalités que le système peut reproduire, mais ne précise pas leur phase ni le moment où elles sont reproduites. Un analyseur à deux voies est nécessaire pour obtenir la réponse de phase de la fonction de transfert. Il compare les tonalités émises et reçues après soustraction du délai de propagation entre le haut-parleur et le microphone.

Depuis les années 1970, la réponse en fréquence est calculée grâce à la transformée rapide de Fourier, un algorithme informatique efficace qui permet une mise en œuvre pratique de la transformée de Fourier. Les résultats peuvent être obtenus en quelques secondes, avec un signal complexe mélangeant les 576 tonalités. La même réponse peut être acquise avec de la musique ou du bruit aléatoire avec notre analyseur SIM (Mesure distincte de la source, qui a remporté le prix R&D 100 en 1992).

Ces mesures permettent de vérifier que le haut-parleur reproduit toutes les fréquences au même niveau. Nous devons également mesurer la réponse de phase pour s'assurer que les signaux qui varient dans le temps, les percussions par exemple, sont reproduits fidèlement, ce qui est le cas lorsque la réponse de phase est nulle à toutes les fréquences. La question devient alors : « Quelle est l'importance de la réponse de phase ? » Elle est très importante si vous souhaitez reproduire un signal avec des transitoires marquées.

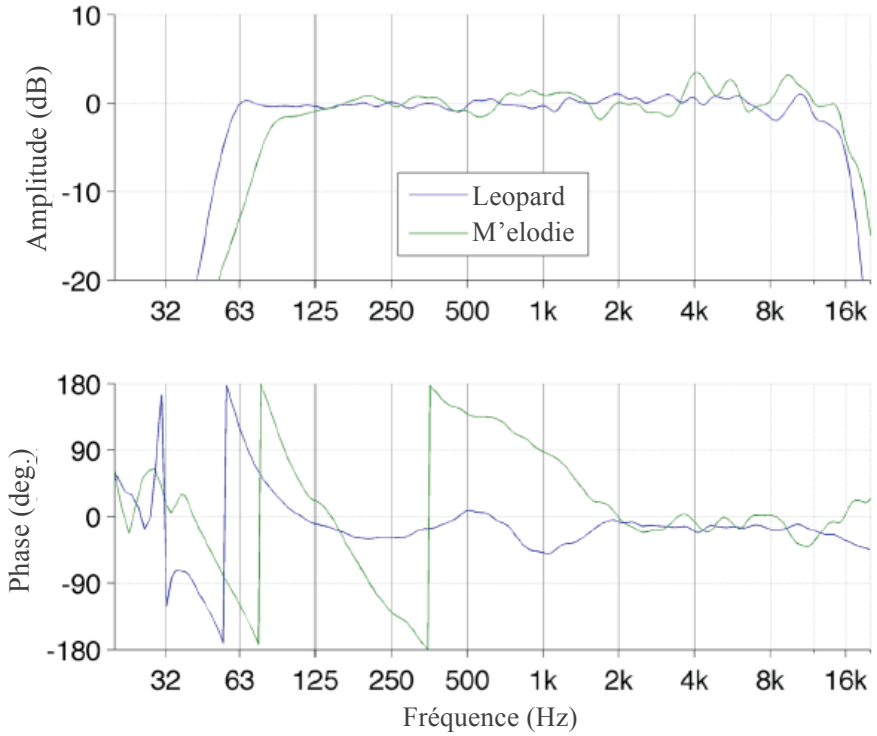


Figure 7. Réponse en fréquence de M'elodie et de LEOPARD à 2 m ; la réponse d'amplitude est représentée dans le panneau supérieur, et la réponse de phase dans le panneau inférieur. Toutes les réponses sont lissées de 1/6ème d'octave. Notez que cette réponse a été utilisée pour la conception de LEOPARD ; sa réponse de sortie est différente sur le produit commercialisé.

Les haut-parleurs de cinéma des années 1930 souffraient de grandes quantités de distorsion de phase, car il était largement admis que nous ne pouvions percevoir la phase et que le décalage de phase ne devait pas affecter la qualité sonore. Néanmoins, les spectateurs se plaignaient de la mauvaise qualité de l'image sonore des spectacles de claquettes.

Regardons maintenant la réponse en fréquence d'un système réel. Le haut-parleur M'elodie a établi une référence en matière de qualité sonore lors de son lancement. Il possède une réponse d'amplitude très plate ; toutes les tonalités sont de même sonie, et la réponse de phase est plate et nulle au-dessus de 2 kHz (figure 7). En comparaison, LEOPARD a une réponse d'amplitude également plate, mais sa réponse de phase est nulle à partir de 125 Hz et au-dessus, ce qui constitue une amélioration remarquable.

Il est très difficile d'atteindre zéro pour la réponse de phase en basse fréquence. C'est une contrainte physique liée au rapport entre la petite taille d'un haut-parleur et la taille des longueurs d'onde qu'il reproduit. Une tonalité de 100 Hz a une longueur d'onde de 3 mètres, soit dix fois plus qu'un haut-parleur de 30 centimètres. Une solution consisterait à créer un haut-parleur de 3 mètres, mais cela présente de nombreux inconvénients évidents. Un compromis raisonnable consiste à rendre la phase nulle au-dessus d'une certaine fréquence, généralement autour de 200 Hz.

Soyez prudent en comparant la réponse de phase de deux haut-parleurs : la comparaison n'est valable que lorsque la réponse d'amplitude est la même. En effet, tout changement d'amplitude, notamment lorsqu'il est le résultat d'une égalisation, produit un changement dans la réponse de phase.

Notez également que la réponse en fréquence illustrée sur la figure 7 a été utilisée par les ingénieurs pour la conception d'un seul haut-parleur LEOPARD. Mais comme LEOPARD est prévu pour être utilisé dans un système à plusieurs haut-parleurs, et jamais seul, la réponse en fréquence finale est celle qui apporte une réponse plate à la TOTALITÉ du système. Garantir la cohérence sonore d'un système de haut-parleurs en ligne de source est un processus complexe qui sera décrit dans un autre article.

L'objectif du haut-parleur est de reproduire non seulement toutes les tonalités, mais également toutes les informations entre les notes, ce qui comprend les états transitoires et les états instables, dans lesquels la phase est cruciale. La musique ne peut être reproduite fidèlement que par les systèmes de haut-parleurs avec une amplitude plate et une réponse de phase plate. L'aspect suivant à considérer est la distorsion, qui, si elle n'est pas contrôlée, peut nettement réduire la qualité d'un haut-parleur, même avec une parfaite réponse en fréquence.

3.2 Puissance

Avant de décrire la distorsion, nous devons d'abord déterminer la bonne sonie d'un haut-parleur, car la distorsion augmente avec le niveau. C'est une partie cruciale de la conception d'un haut-parleur, en particulier pour un modèle de haute puissance tel que LEOPARD.

La puissance, ou sonie, est liée à la pression acoustique (SPL), qui est une moyenne quadratique (RMS) mesurée en moyenne sur une période de temps et qui peut être calculée par presque tout appareil de mesure de pression acoustique. Comme il est très difficile de mesurer la puissance directement, la plupart des haut-parleurs sont classés selon la SPL maximale qu'ils peuvent produire à une certaine distance.

Un point important concernant la puissance est son indépendance du signal généré. Avec une onde sinusoïdale, toute la puissance se trouve dans une seule fréquence. Avec le bruit rose, la puissance s'étale dans le temps et la gamme de fréquences audibles. La puissance totale peut être la même dans les deux cas.

Le type de signal détermine également la marge requise, ou différence entre le niveau de crête et le niveau RMS. Le niveau de crête est une mesure instantanée. Il est supérieur au niveau RMS de 3 dB pour une onde sinusoïdale et de 12 dB pour le bruit

rose.[2] Un haut-parleur doit atteindre les niveaux de crête sans écrêtage (qui produit de grandes quantités de distorsion) pour reproduire fidèlement un signal. Même si un haut-parleur est en mesure de suivre une onde sinusoïdale, rien ne permet de garantir qu'il peut reproduire le bruit rose au même niveau, car ce dernier exige plus de marge.[3]

LEOPARD a été conçu pour être deux fois plus puissant que M'elodie. Par conséquent, il doit atteindre 106 dB SPL à 2 m avec 12 dB de marge pour reproduire le bruit rose. Les deux haut-parleurs LF de LEOPARD doivent produire chacun 100 dB SPL.

Le haut-parleur LF prototype de LEOPARD peut produire une sortie mesurée de 106 dB SPL pour une onde sinusoïdale de 90 Hz à 2 m. En comparaison, un haut-parleur générique LF de 20 cm produit 102 dB SPL dans les mêmes conditions.

3.3 Distorsion d'une seule tonalité

Un haut-parleur parfaitement linéaire est défini comme étant un piston dont le mouvement suit précisément son entrée. Toute déviation de la linéarité est appelée distorsion, et n'est jamais souhaitable. Mais même un piston complètement linéaire réagit avec l'air et produit une distorsion. C'est une limite théorique de distorsion pour n'importe quel bruit aérien.

En général, une distorsion dans l'air se produit car la pression peut augmenter indéfiniment, mais ne peut descendre en dessous d'un vide (zéro). Autrement dit, un mouvement linéaire ne conduit pas à des variations de pression linéaires.

Plus précisément, considérons le cas d'un haut-parleur piston dans un espace clos, comme le montre la figure 8. Lorsque le piston avance à mi-chemin, le volume diminue de 50 % et la pression dans l'espace double. Lorsque le piston recule de la même distance, le volume atteint 150 % et la pression diminue à 67 %, et non 50 %. Ce phénomène a été décrit et calculé par Olson dans les années 1940.

[2] Les ingénieurs préfèrent prendre en compte le niveau RMS et le mesurer, car il est directement lié à la puissance. Les niveaux de crête ne le sont pas, ce qui rend plus difficile la comparaison des performances entre différents signaux.

[3] Bien que le bruit rose nécessite plus de marge dans un système, il masque également la distorsion. En règle générale, il est impossible de détecter une distorsion de moins de 10 % en utilisant un bruit rose.

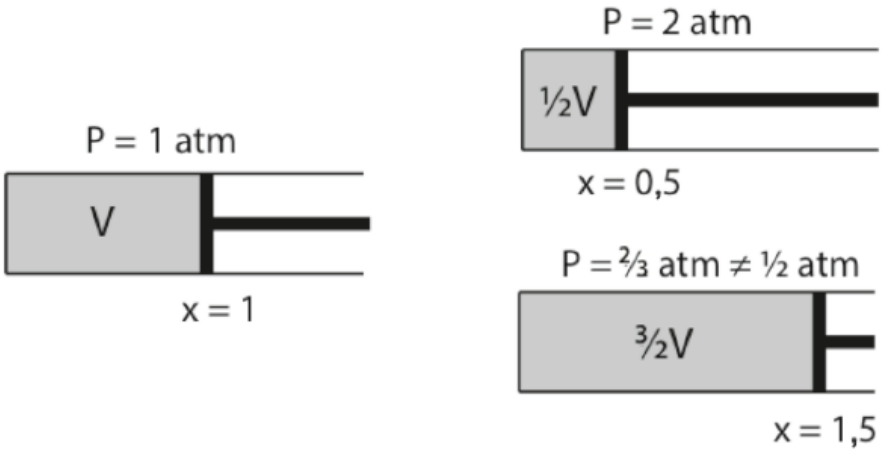


Figure 8. Démonstration de la distorsion de l'air. Un piston se déplace dans un espace clos. Les déplacements vers l'avant et vers l'arrière produisent la même variation de volume (la moitié ici) mais pas la même variation de pression.

Examinons maintenant la distorsion harmonique, sur laquelle nous avons un certain degré de contrôle. Nous ne voulons pas que le système modifie les tonalités, par exemple, en ajoutant ses propres harmoniques. Cela se produit lorsque le haut-parleur ne peut ni trop avancer ni trop reculer sans s'endommager (ce qui est souvent appelé distorsion d'écrêtage).

Certains harmoniques sont plus audibles que d'autres. Par exemple, presque toutes les notes musicales comprennent un 2^{e} harmonique (deux fois la fréquence fondamentale). Ce 2^{e} harmonique est difficile à détecter, et n'est seulement audible que quand il est présent à plus de 3 %. Les harmoniques supérieurs sont plus faciles à détecter : 2 % pour le 3^{e}, 1% pour le 5^{e} ou le 7^{e}. Cependant, les fréquences qui ne sont pas en relation harmonique avec la note d'origine sont détectables à partir de 0,1 %.

La distorsion harmonique est simple à mesurer : il suffit d'envoyer un son pur au système de test et de rechercher les harmoniques. Le taux de distorsion harmonique total (THD) est la puissance totale de tous les harmoniques par rapport à la puissance de la note fondamentale. La sonie de la tonalité peut être suffisamment augmentée pour générer 10 % de THD, qui est considéré comme étant la distorsion maximale avant de perdre le contrôle du système. À ce stade, le haut-parleur LEOPARD est supérieur aux systèmes génériques et à M'elodie de 4,5 dB. Soyez prudent avec ces chiffres, car ce test n'indique pas ce qui se passe en dessous du seuil de distorsion de 10 %. Pour un bon haut-parleur, la distorsion doit chuter rapidement à mesure que le niveau décroît. Pour les mauvais haut-parleurs, la distorsion décroît lentement.

Étudions la distorsion harmonique du haut-parleur LEOPARD. La figure 9 montre le spectre d'un système LEOPARD complet (haut-parleurs LF et HF, amplificateur, et filtre répartiteur) produisant une tonalité de 500 Hz à 106 dB SPL à 2 m. Notez que la mesure de la distorsion du 2^{e} harmonique est égale à la limite inférieure de la distorsion de l'air : 0,2 %. Un haut-parleur ne peut produire 106 dB SPL avec moins de

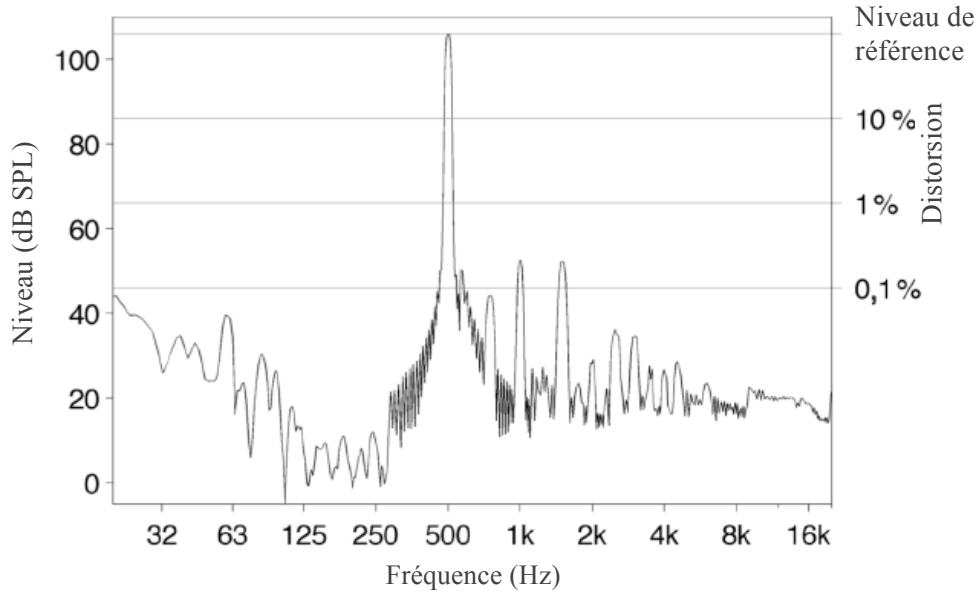


Figure 9. Spectre de réponse d'un système LEOPARD complet pour une tonalité de 500 Hz à 106 dB SPL mesurée à 2 mètres. Notez que la mesure de la distorsion du 2e harmonique est juste à la limite de 0,2 % de distorsion de l'air.

distorsion. Quand un système de haut-parleurs produit 30 % de distorsion au 3e harmonique, la suppression de l'harmonique est très difficile.

Si l'on ajoute un filtre avant le haut-parleur à la fréquence du 3e harmonique, cela n'aura aucun effet car l'harmonique est généré par le haut-parleur. J'ai rencontré ce problème une fois lors d'un concert de STYX dans les années 1980, et ce fut une expérience très frustrante. La seule façon de supprimer l'harmonique est de réduire à l'aide d'un filtre le niveau de la note fondamentale, ou de réduire la sonie du système. Les filtres linéaires ne fonctionnent correctement que sur les systèmes sonores linéaires. Un corollaire étant qu'il est facile d'ajouter des harmoniques à un système linéaire.

3.4 Distorsion de plusieurs tonalités

Les distorsions résultant d'interactions entre les tonalités sont plus difficiles à mesurer que les distorsions d'une seule tonalité. Nous avons donc besoin de signaux de test spéciaux pour chaque type de distorsion.

Commençons par la modulation de fréquence (MF), une autre limitation fondamentale des haut-parleurs. Même un haut-parleur parfaitement linéaire produit une distorsion MF, appelée également distorsion de Doppler ou battement, lorsque deux ou plusieurs tonalités sont reproduites simultanément. Une distorsion MF se produit quand les vitesses de deux tonalités s'ajoutent lorsqu'elles vont dans la même direction (et se soustraient lorsqu'elles vont dans des directions opposées).

Si nous envoyons des tonalités de 80 Hz et 440 Hz à un haut-parleur, le signal de 80 Hz modulera la fréquence porteuse de 440 Hz. Si le piston du haut-parleur basse fréquence se déplace avec une excursion de crête de 0,5 cm, la vitesse de pointe est de 2π × (modulation de fréquence) × (excursion de crête), ou

$$2\pi \times 80\ \text{Hz} \times 0{,}5\ \text{cm} = 251\ \text{cm/s}.$$

La valeur du décalage de fréquence est donnée par (fréquence porteuse) x (vitesse maximale) / (vitesse du son). Pour cet exemple, la distorsion MF est

$$(440\ \text{Hz}) \times (251\ \text{cm/s}) \,/\, (34\,400\ \text{cm/s}) = 3{,}2\ \text{Hz},$$

qui est considérée comme étant en dessous du seuil d'audibilité.

La tonalité de 440 Hz se décale de 3,2 Hz en fréquence en raison du mouvement du haut-parleur basse fréquence. Ce battement est un changement de fréquence rapide d'avant en arrière (80 fois par seconde dans ce cas). Ce n'est pas une tonalité mais une variation de fréquence tout comme le vibrato. En fait, la distorsion MF est la même pour tous les niveaux de fréquence porteuse. Dans ce cas, l'excursion à 80 Hz seule détermine la fréquence de battement.

Un haut-parleur linéaire reproduit également une « fréquence de battement », issue de deux tonalités rapprochées. Par exemple, les tonalités 440 et 450 créent une fréquence de battement de 10 Hz. Ce son de 10 Hz n'est pas une véritable tonalité puisque le haut-parleur ne crée pas cette fréquence. Sa perception est créée dans notre oreille. Dans cet exemple, un diapason de 10 Hz ne serait pas excité par ce battement.[4]

Étudions maintenant un type de distorsion que nous pouvons réduire à l'aide d'une bonne conception : la distorsion d'intermodulation (IM), qui est créée lorsque deux fréquences interagissent de façon non linéaire entre elles. La signature de l'IM se caractérise par des tonalités à l'état stable en phase entourant la tonalité supérieure. Si nous envoyons deux fréquences, 80 et 440 Hz, à un haut-parleur non linéaire, nous verrons sur un analyseur de spectre des fréquences de 80, 440, 440-80 = 360, 440+80 = 520 Hz. Ces produits d'IM, comme on les appelle, possèdent des distorsions harmoniques qui leur sont propres et qui, à leur tour, créent d'autres produits d'IM avec toutes les autres fréquences présentes. On sait depuis les années 1950 que la distorsion d'intermodulation crée une qualité sonore « voilée ».

L'IM et d'autres types de distorsion peuvent être devoilés en combinant plusieurs tonalités sinusoïdales en une forme d'onde plus complexe. Un bon signal de test est produit par l'ajout de tonalités de 80, 100, 125, 225 et 440 Hz en phase (figure 10). Leur somme a une amplitude RMS de 9,1 dB en dessous du niveau de crête. Nous choisissons ces fréquences car toute distorsion créée possède des lignes spectrales discrètes dans le domaine fréquentiel.

[4] Pour convertir cette fréquence de 10 Hz en véritable tonalité, vous devez soit augmenter la SPL jusqu'à rendre l'air très non-linéaire, ou utiliser un haut-parleur très non-linéaire. Cela s'appelle hétérodyne.

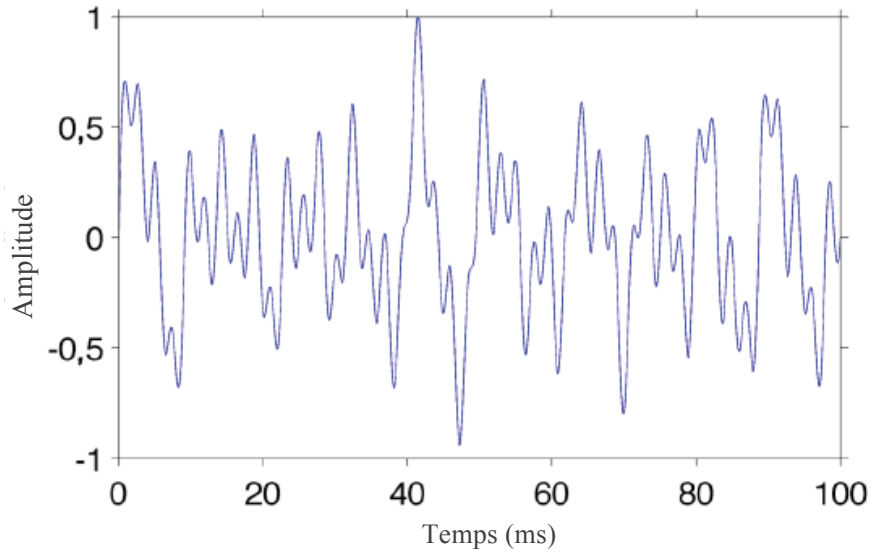


Figure 10. Mesures de distorsion du signal de 5 tonalités contenant des tonalités à 80, 100, 125, 225 et 440 Hz.

La figure 11 représente trois systèmes sonores recevant notre signal de test de 5 tonalités : LEOPARD, M'elodie et un système générique. Le signal complexe de 5 tonalités est émis au niveau le plus élevé de pression sonore qui n'enclenche pas les limiteurs de protection de M'elodie, soit 100 dB SPL RMS (crête de 109 dB) à 2 m.

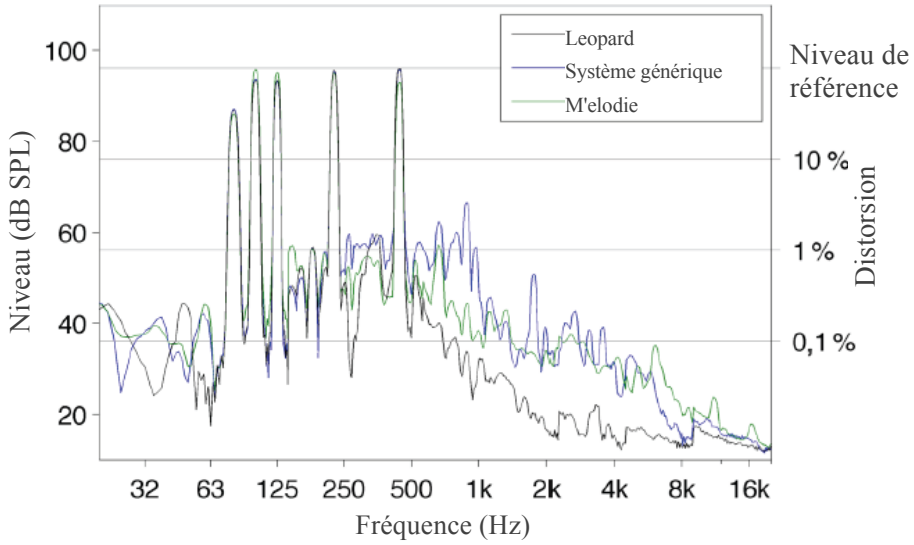


Figure 11. Réponse spectrale des trois haut-parleurs pour le signal de test de 5 tonalités de la figure 10. La tonalité est émise à 100 dB SPL RMS et mesurée à 2 m.

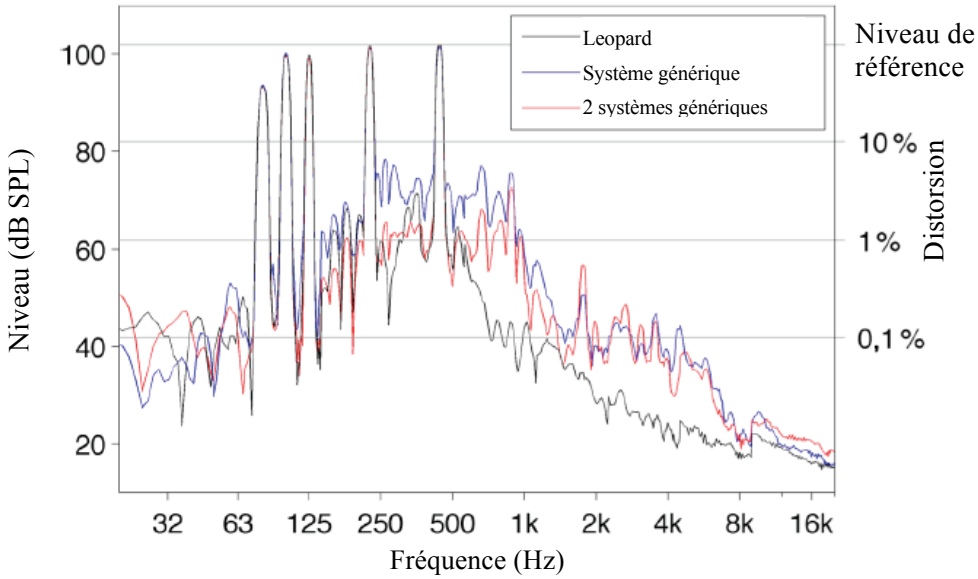


Figure 12. Réponse spectrale du signal de test de 5 tonalités émis à 106 dB SPL (crête de 115 dB) à 2 m. Les deux systèmes génériques sont configurés avec un signal d'entrée à -6 dB afin que le niveau résultant reste à 106 dB SPL.

Notez que le système générique présente la plus grande distorsion de 500 à 1 000 Hz, mais correspond à la distorsion de M'elodie de 1 à 4 kHz. LEOPARD présente beaucoup moins de distorsion que les autres systèmes.

Rappelons que notre objectif pour LEOPARD est que sa sonie soit de 6 dB de plus que celle de M'elodie. Nous pourrions atteindre cet objectif en utilisant les mêmes amplificateurs de puissance que M'elodie, mais en les augmentant de 6 dB, comme le système générique. Malheureusement, cela produirait plus de distorsion.

Au lieu de cela, nous avons spécifiquement conçu les haut-parleurs de LEOPARD pour ce niveau de sortie plus élevé. Ceci est visible à la figure 12, où nous avons augmenté le niveau à 106 dB SPL (crête de 115 dB) à 2 m, sans engager les limiteurs de protection.

À ce niveau, le système générique présente 10 fois plus de distorsion et est clairement dans un état très non-linéaire. En règle générale, la distorsion chute proportionnellement avec le niveau ; nous pouvons nous attendre, par conséquent, à une réduction de 10 fois pour une baisse de 20 dB SPL. Par exemple, un micro ayant une distorsion de 1 % à 140 dB SPL a une distorsion estimée de 0,1 % à 120 dB. Ceci n'est vrai que lorsque le système se comporte bien. Cependant, quand on réduit le niveau du système générique de 6 dB, la distorsion diminue comme prévu en dessous de 500 Hz mais pas au-dessus. Cela signifie que le niveau de distorsion HF de deux systèmes génériques, chacun étant réduit de 6 dB, sera toujours supérieur à celui d'un système LEOPARD.

Ce test de 5 tonalités révèle des non-linéarités non détectables avec une seule tonalité. Pour en revenir à l'expérience de Helmholtz, la forme d'onde multi-tonalité

change si la phase de l'un de ses composants change. Nous pourrions, par exemple, ajuster les phases pour émettre un signal de test avec moins de niveau de crête, mais avec le même niveau de RMS. Une crête réduite signifie que le haut-parleur produit moins de distorsion dans un système non-linéaire (Perrin Meyer et David Wessel). C'est une façon de tester la distorsion d'un système.

Nous ne pouvons compenser tous les mécanismes non linéaires des haut-parleurs, et les améliorations, ce qui n'est pas surprenant, ont un coût plus élevé : de plus grands aimants et des bobines doubles, gérées chacune par un amplificateur distinct.

Avant de refermer le chapitre du haut-parleur LF, nous devons déterminer la limite de fréquence supérieure, qui est contrainte par la distorsion MF (DMF) et qui augmente avec la gamme de fréquences (des plus basses au plus hautes) produites par le haut-parleur. Par exemple, un haut-parleur LEOPARD en pleine excursion à 50 Hz produisant également une tonalité à 2 kHz présente une DMF de 18 Hz. La réduction de la tonalité supérieure à 600 Hz réduit la DMF à 5,4 Hz.

Nous devons activer la répartition à 600 Hz ou en dessous pour que la DMF reste inférieure à 6 Hz. La SPL peut être augmentée soit en élargissant le piston, soit en augmentant son excursion, ou les deux. Puisque l'excursion est déjà à son maximum pour un niveau acceptable de DMF, notre seul choix est d'augmenter la surface du cône. Par exemple en utilisant deux haut-parleurs LF.

4 Directivité

4.1 Réponse polaire des haut-parleurs LF

Maintenant que nous avons parlé de la distorsion, nous pouvons examiner la directivité des haut-parleurs, c'est-à-dire leurs modèles polaires. Ceci est crucial pour développer des haut-parleurs produisant un son cohérent dans leur zone de couverture. Commençons par deux haut-parleurs LEOPARD à basse fréquence positionnés l'un à côté de l'autre.

Dans la figure 13, nous regardons deux sources sonores montées sur un mur déflecteur et dirigées vers le vide. Aucun autre mur n'est présent.

Lorsque nous convertissons ce champ de pression acoustique en un diagramme polaire, nous pouvons tracer une ligne reliant les points SPL égaux, appelée isocontour (figure 14). Elle ressemble à l'isobare des cartes météo. Les lobes latéraux où la réponse est à zéro sont plus visibles ici que sur la figure 13. Ces lobes sont causés par les interférences destructives là où les ondes sinusoïdales de chaque haut-parleur sont déphasées de 180° et s'annulent complètement. Les ondes sinusoïdales sont en phase et s'additionnent en une interférence constructive au centre du lobe. Cette structure lobe/nulle signifie que cette tonalité disparaît à certains angles, ce qui est le pire des cas possible pour un haut-parleur.

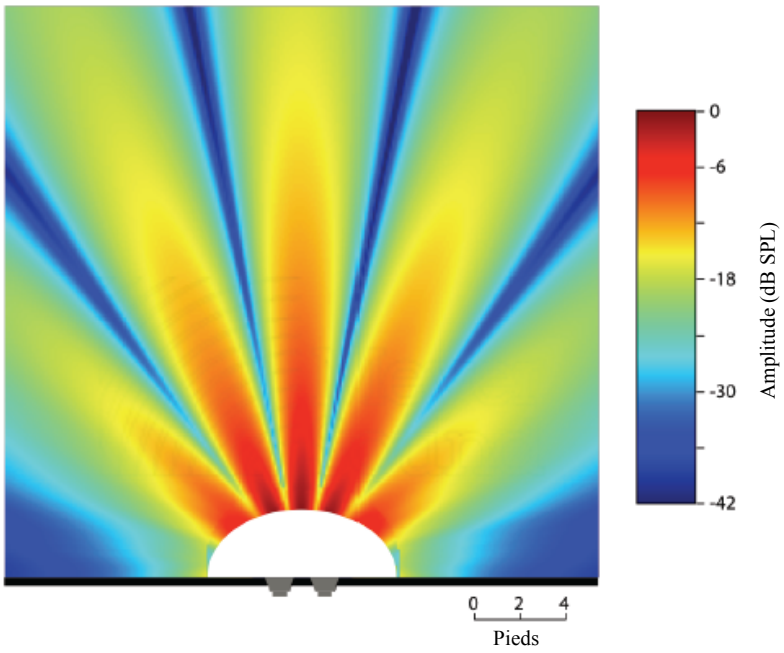


Figure 13. Champ de pression sonore de deux haut-parleurs montés sur un mur déflecteur (bas de la figure) et espacés de 2,5 fois la longueur d'onde de la tonalité pure qu'ils reçoivent. Dans ce cas, la fréquence est de 1,4 kHz, et l'espacement est de 2 pieds (30 cm).

Les lobes secondaires disparaissent lorsque l'espacement des haut-parleurs est réduit à une demi longueur d'onde (figure 15). Ce type de diagramme polaire peut être interprété de deux façons, en prêtant attention aux points marqués à -3, -6 et -10 dB.

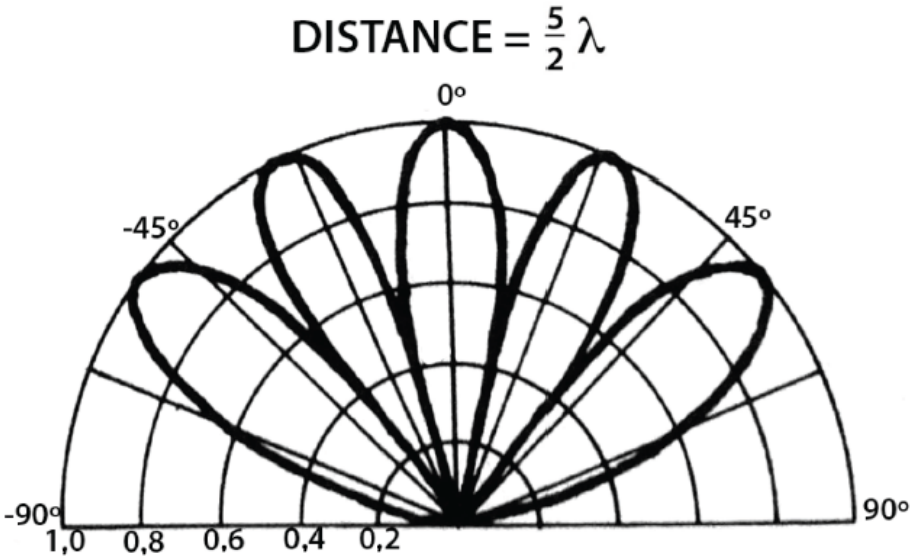


Figure 14. Diagramme polaire indiquant une réponse SPL égale pour deux sources sonores espacées comme dans la figure 13. La pression sonore est indiquée à une distance fixe en fonction de l'angle, et est normalisée au niveau à 0° (Olson).

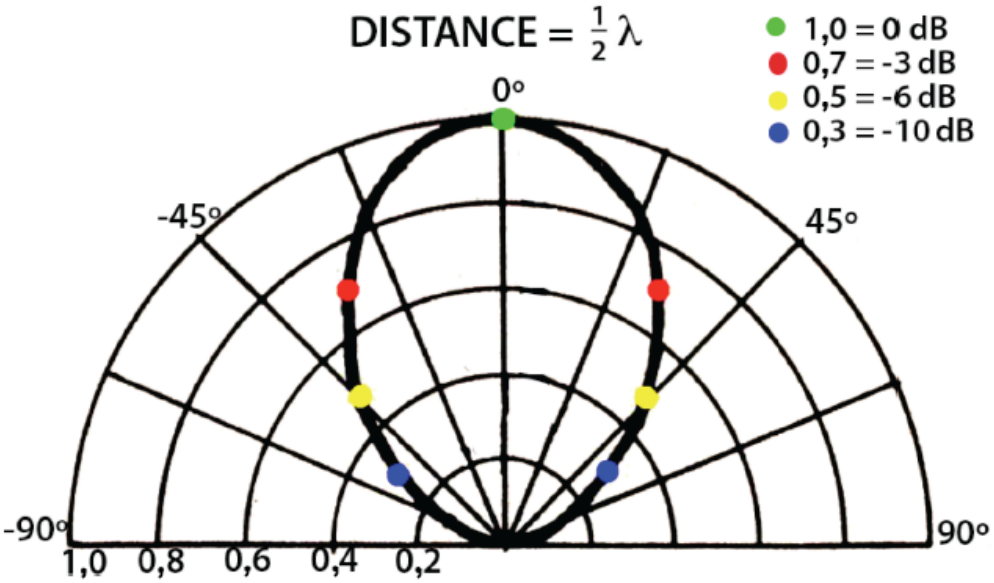


Figure 15. Diagramme polaire indiquant des contours SPL égaux pour deux sources sonores espacées d'une demi longueur d'onde.

La SPL est la même sur tous les points le long de cette ligne. Plus on s'éloigne vers les côtés (90˚), plus on se rapproche des haut-parleurs. Le point 1.0 du diagramme polaire, ou point d'unité, se rapporte à l'éloignement de la source sonore. Nous utilisons 1 mètre à 0˚ comme référence d'unité. À 45˚ d'écartement du centre, la distance est de 0,5 m du haut-parleur (puisque -6 dB équivaut à un facteur de ½).

Alternativement, la SPL diminue du même facteur (6 dB) le long du cercle le plus éloigné. À 45˚, la SPL est de moitié (-6 dB), et à 55˚, le niveau passe à 0,3 (-10 dB). Par conséquent, si nous avions 106 dB SPL à 0˚, nous constaterions 100 dB SPL à 45˚.

En aparté, la différence entre un diagramme polaire avec une échelle linéaire et un diagramme avec une échelle logarithmique est énorme. L'échelle logarithmique élargit le lobe principal et rend le reste du diagramme plus étroit. Une échelle logarithmique signifie que le diagramme polaire n'a pas d'interprétation physique directe. On ne peut pas superposer le diagramme logarithmique sur un espace linéaire, telle qu'une pièce, ni se déplacer le long de la ligne pour obtenir un contour de sonie égale comme décrit ci-dessus.

La largeur de ce diagramme polaire est appelée largeur de faisceau (BW). Dans les années 1950, l'industrie audio a défini la largeur de faisceau d'une source directionnelle comme étant l'angle total entre les points à -6 dB. Dans le cas de la figure 15, la BW est de 90˚.[5]

[5] Les autres disciplines qui utilisent des guides d'ondes, notamment l'hyperfréquence et l'acoustique sous-marine, utilisent le point de demi-puissance de -3 dB.

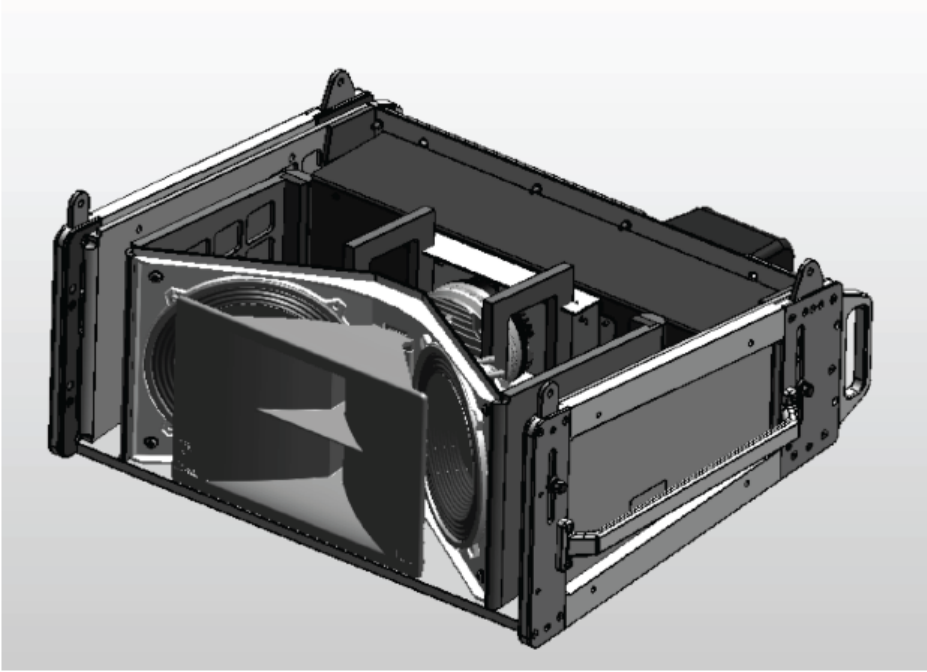


Figure 16. Conception mécanique du système LEOPARD.

Soyez prudent : certains fabricants de haut-parleurs définissent la largeur de faisceau comme étant l'angle entre les points à -10 dB. Avec cette définition, la BW de la figure 15 serait de 110˚, soit 20˚ plus large. Nous vous avons montré trois façons de regarder le même champ de pression : le diagramme de pression en 2D, le diagramme polaire, et la largeur de faisceau (discutée en détail à la figure 19).

Par conséquent, avec l'espacement de deux pieds des figures 13 et 14, la fréquence la plus haute sans lobes secondaires est de 280 Hz. Cet espacement permet d'insérer un pavillon HF entre les deux haut-parleurs LF. Cependant, nous ne pouvons pas utiliser les deux haut-parleurs LF ensemble au-dessus de la limite du lobe de 280 Hz. Nos concepts passés ont utilisés deux haut-parleurs LF ensemble au-dessous de 280 Hz et un seul haut-parleur au-dessus de cette fréquence. Un seul haut-parleur de 20 cm peut être utilisé jusqu'à 2 kHz, et il devient trop directionnel au-delà. Cette conception a été utilisée pour le système M'elodie et offre une marge de manœuvre importante pour la répartition vers le pavillon haute fréquence du haut-parleur.

Une autre approche consiste à utiliser deux haut-parleurs jusqu'à 500 Hz afin de maintenir une SPL élevée. Pour éviter les lobes secondaires, leur espacement devrait être environ de la moitié de la longueur d'onde de 500 Hz, soit 30 cm. Une conception innovante a permis d'atteindre cet objectif (figure 16). Les ondulations dans les basses fréquences introduites par le pavillon HF sont résolues par des filtres électroniques spéciaux de l'amplificateur de puissance intégré à LEOPARD.

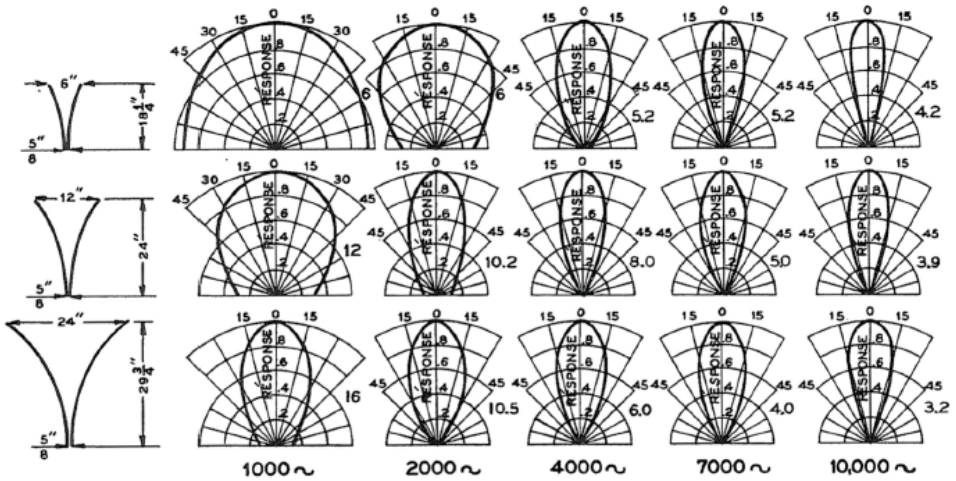


Figure 17. Réponse polaire de trois pavillons exponentiels différents à cinq fréquences (Olson).

4.2 Historique de la réponse polaire des haut-parleurs HF

Maintenant que nous avons complètement spécifié le haut-parleur LF, tournons-nous vers le haut-parleur HF. La couverture horizontale est contrôlée ici par un pavillon (ou guide d'onde). Nous voulions que notre pavillon ait une bande passante constante de 500 Hz à 16 kHz. C'était très difficile à réaliser auparavant, mais l'utilisation d'ordinateurs de grande puissance pour la modélisation nous a permis de concevoir une nouvelle solution pour LEOPARD. Examinons l'historique des pavillons avant de décrire cette solution.

Regardons quelques diagrammes polaires de pavillons exponentiels développés dans les années 1930 (figure 17), qui sont utiles pour une couverture étroite. Malheureusement, ils ont des niveaux élevés de distorsion.

Les produits suivants introduits dans les années 1940 incorporaient plusieurs pavillons exponentiels par unité, appelés pavillons multicellulaires (figure 18). Cet assemblage est d'une largeur de 81 cm. Vous pouvez voir que la réponse polaire est la plus étroite autour de 500 Hz.

Beranek a présenté un diagramme de largeur de faisceau pour les pavillons multicellulaires, mesurant la BW comme étant l'angle entre les points à -6 dB (figure 19). Avec ce genre de diagramme, le modèle étroit dans le milieu de gamme est très évident. C'est l'endroit où la largeur du pavillon se rapproche de la longueur d'onde. Avec ce genre de diagramme, toute structure du lobe au-delà des points à -6 dB est perdue.

Autre pavillon intéressant, le pavillon parabolique (appelé également pavillon radial) possède des parois verticales de forme exponentielle et des parois horizontales rectilignes (figure 20). Le pavillon de diffraction est une variante avec des parois verticales parallèles et le même modèle polaire horizontal. Mais les pavillons de diffraction sont de tous les pavillons ceux qui produisent la plus grande quantité de distorsion. Ces pavillons ont un angle de couverture étroit autour de la longueur d'onde de la largeur horizontale du pavillon.

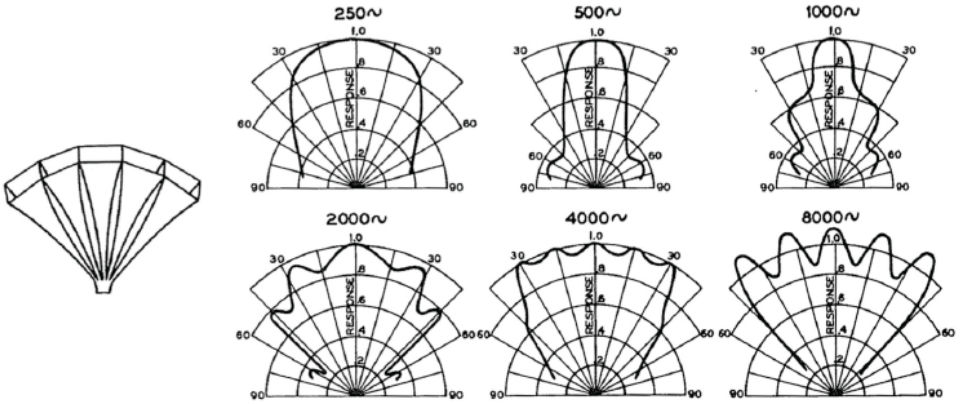


Figure 18. Réponse polaire d'un pavillon multicellulaires pour six fréquences (Olson).

Durant les 50 années suivantes, de nombreux pavillons ont été produits et considérés comme ayant une directivité constante. Malgré une présentation avantageuse de leurs fonctionnalités, ils comportaient des améliorations sur les modèles précédents. Une des difficultés rencontrées dans la détermination de la performance est que la largeur de faisceau était calculée après lissage de la réponse en fréquence. Cela avait pour conséquence de combler les vides et rendre le diagramme polaire plus lisse qu'en réalité. En outre, de nombreuses fiches produits ne comportaient que peu d'indications, voire aucune, sur la manière dont les données étaient mesurées.

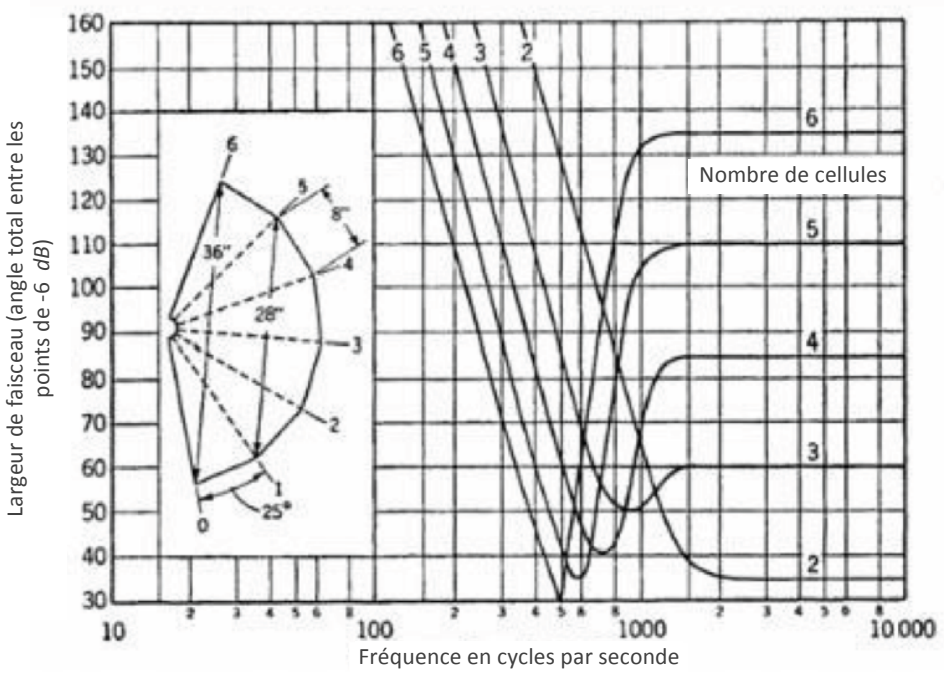


Figure 19. Largeur de faisceau d'un pavillon multicellulaires construit à partir d'un nombre variable de cellules (Beranek).

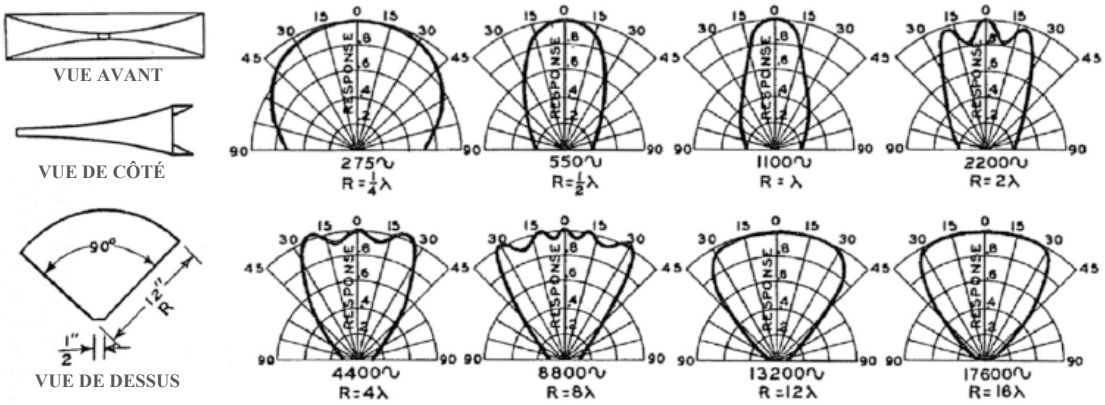


Figure 20. Réponse polaire d'un pavillon radial de 30 cm pour huit fréquences (Olson).

Nous avons décidé de publier des données polaires linéaires à haute résolution en 2000 ; elles sont disponibles sur Internet via le programme MAPP Online™. Ce programme peut prédire avec précision les annulations et les lobes à une distance quelconque, car il utilise des données haute résolution sans lissage.

4.3 Le pavillon HF de LEOPARD

Revenons au système LEOPARD. Nous avons besoin d'un petit pavillon de 30 cm capable de se loger entre les deux haut-parleurs LF et qui a une couverture horizontale de 110˚ entre 500 et 16 000 Hz. Notre intention est d'utiliser les deux haut-parleurs LF jusqu'à 600 Hz, ce qui réduit considérablement nos options de répartition par rapport au système de haut-parleurs M'elodie (qui permet une répartition entre 280 et 2 000 Hz). Le pavillon générique est, à ce jour, la meilleure tentative des autres fabricants pour résoudre le rétrécissement de la BW entre 500 et 2 000 Hz. Les réponses mesurées du pavillon générique et de M'elodie sont présentées dans la figure 21, avec les pavillons intégrés dans leur boîtier.

La réponse polaire du pavillon de LEOPARD mesurée dans l'espace libre (figure 22), montre une largeur de faisceau remarquablement constante de 110˚, nettement plus constante que les autres pavillons de la figure 21. Cette conception a été réalisée à l'aide d'une modélisation informatique avant toute construction de prototype.

4.4 Le haut-parleur HF de LEOPARD

LEOPARD utilise un nouveau moteur de compression pour le pavillon décrit plus haut. Il est conçu pour augmenter de 6 dB le niveau de sortie par rapport au moteur de compression utilisé dans M'elodie. Le diaphragme de 7,6 cm (piston) n'a pas de modes de rupture sous 18 kHz. Cela permet non seulement de réduire les distorsions à des niveaux plus élevés, mais également de prolonger la durée de vie à des niveaux de sortie élevés. La surcharge de l'air dans le pavillon doit être le facteur limitatif de la distorsion, à condition de rendre le haut-parleur linéaire.

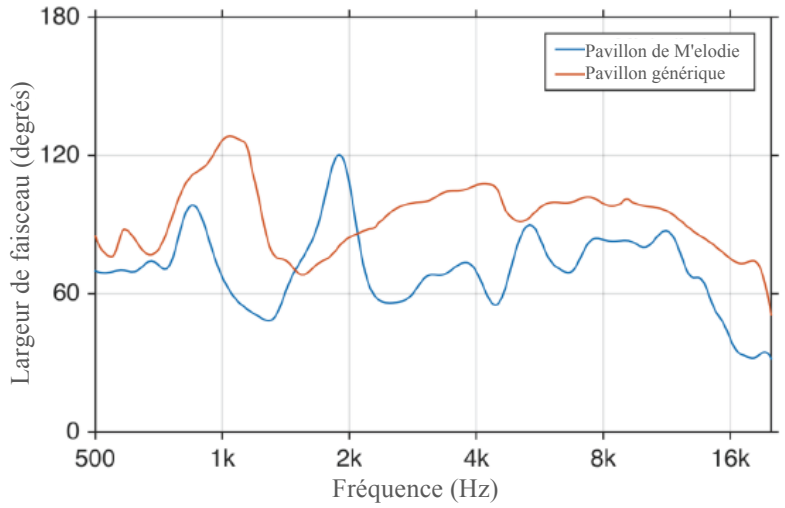


Figure 21. Largeur de faisceau horizontale mesurée pour deux types de pavillons. La largeur de faisceau est mesurée à 2 m et est calculée à partir du point à -6 dB avec un lissage de 1/6ème d'octave.

La forme du pavillon de LEOPARD est un équilibre entre contrôle directionnel et diminution de la distorsion de l'air, cette dernière étant atteinte grâce à un taux d'expansion rapide près de la gorge, de sorte que la SPL décroît rapidement à mesure que l'onde se déplace vers la bouche du pavillon. La meilleure condition pour générer une distorsion consiste à émettre un son de haute pression à travers un tube. Plus le tube est long et étroit, plus la distorsion est importante, ce qui explique pourquoi les pavillons de diffraction souffrent d'une telle distorsion. La distorsion du 2^{e} harmonique augmente avec la fréquence pour la même SPL dans un pavillon exponentiel.

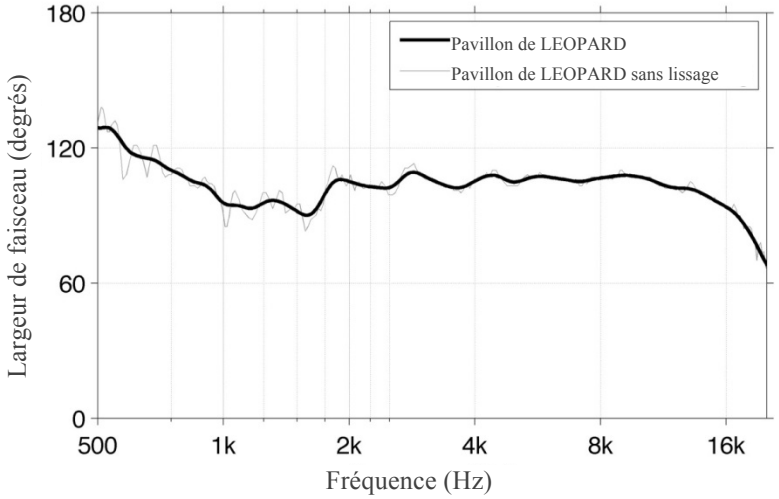


Figure 22. Largeur de faisceau horizontale du prototype de pavillon de LEOPARD mesurée comme dans la figure 21.

La réponse mesurée du pavillon de LEOPARD correspond très bien aux calculs pour une sortie de 106 dB SPL à 2 m. Les distorsions mesurées et calculées du 2e harmonique sont de 1,2 % pour une tonalité de 1 kHz. La distorsion calculée du 2e harmonique est de 2,5 %, tandis que LEOPARD produit seulement 3 % à 2 kHz. Le 3e harmonique est inférieur à 0,3 %, ce qui est un indicateur de très faible distorsion mécanique « d'écrêtage doux ».

Ce type de moteur de compression HF n'a pas été généralement disponible sur le marché car il est dépourvu de toute protection physique. Un type de haut-parleur HF développé dans les années 1940 pour les systèmes de répartition passifs, encore en usage aujourd'hui, possède des suspensions très rigides offrant une protection à des fréquences inférieures à celle du seuil du pavillon. Ils réagissent également moins aux variations d'impédance du pavillon, ce qui provoque des pics et des creux dans la réponse en fréquence. En revanche, le haut-parleur HF de LEOPARD se fonde uniquement sur une protection électronique.

5 Références

Beranek, Leo (1954). *Acoustics*. New York : McGraw-Hill.
Olson, Harry F. (1957). *Acoustical Engineering, 3è édition* Philadelphie : Professional Audio Journals.